

21 世纪高等学校电子信息类教材

数字微波通信系统

● 唐贤远 李 兴 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

本书以微波通信系统为研究对象，主要介绍微波通信系统的基本组成、工作原理、性能指标、设计方法、测试方法、应用实例等。

21世纪高等学校电子信息类教材

数字微波通信系统

唐贤远 李 兴 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以数字微波中继通信为线索,深入浅出地介绍了数字微波通信系统的基本组成、基本原理、基本知识和技术。

全书共分8章,内容包括数字微波通信系统的基本组成、数字基带传输、数字微波调制与解调技术、微波传播、微波 SDH 传输技术、数字微波通信系统的传输设备,以及数字微波中继系统的总体设计考虑和整机的重要性能指示的测试方法等。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息科学与技术 and 电子工程等专业本科生教材,也可作为研究生的参考教材,对有关专业技术人员也有一定的阅读价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字微波通信系统/唐贤远,李兴编著. —北京:电子工业出版社,2004.10

21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-00439-9

I. 数... II. ①唐... ②李... III. 数字通信系统:微波通信系统—高等学校—教材 IV. TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 103693 号

策划编辑:韩同平

责任编辑:王 颖 姚晓竞

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:339.2 千字

印 次:2004 年 10 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:19.80 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

本教材以数字微波中继系统为线索,系统地介绍了数字微波通信系统的基本组成、基本原理、基本技术、微波传播、系统设计方法、数字微波中继系统的整机性能测试方法、微波通信的最新成果及发展方向。

在本书编著时充分注意到,通过本课程的学习,不仅让学生了解数字微波通信系统的有关知识,还应初步了解复杂电子系统组成的基本概念。作为一次专业基础知识与实际系统相联系的尝试,有助于学生能力提高。

本教材具有较强的理论性、实用性、系统性和技术前瞻性;在文字表达上力求条理清楚、深入浅出、通俗易懂、循序渐进;除必要的数学分析外,尽量回避繁琐的数学推导,突出重点,强调物理概念,用直观的图解方法解释物理问题,图文并茂。

全书共分8章:

第0章 概论:包括数字微波通信的发展,数字微波通信的特点。

第1章 数字基带传输:此章为本书的完整性而写。

第2章 数字微波调制与解调技术:包括数字微波通信常用的调制和解调方法,如2ASK、2PSK、4PSK、4DPSK、8PSK、8DPSK、16QAM等。

第3章 微波传播:介绍微波在大气中传播的衰落特性、路由设计和抗衰落技术。

第4章 微波 SDH 传输技术:介绍微波通信的最新成果和实用技术。

第5章 数字微波通信的传输设备:数字微波通信收、发信设备的组成与性能指标,微波通信对天线设备的要求,微波通信系统的噪声计算等。

第6章 数字微波中继系统的总体设计考虑:假设参考通道与传输质量标准,射频波道的频率配置,系统性能的估算与指标分配,路径效应和大气效应的估计与控制。

第7章 数字微波中继系统的整机性能测试:微波收发信机性能测试,误码性能测试,时钟抖动性能测试,抗频率选择性衰落性能测试等。

本书自成系统,便于自学,可作为通信工程、电子信息科学与技术、电子工程和其他相近专业本科生教材,也可作为研究生参考教材,同时也可供从事这方面工作的广大科技工作者阅读和参考。

本书由唐贤远主编,唐贤远和李兴博士执笔,王玉明硕士画了全部插图,刘述章教授审阅了全书。在此表示衷心的感谢!

由于本教材涉及专业技术面广、涵盖内容多、技术层次新,加之作者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,恳请读者予以指正。

编著者

2004年5月

目 录

第 0 章 数字微波通信概述	1
0.1 数字微波通信发展概况	1
0.2 数字微波通信的主要特点	1
0.3 数字微波通信系统的组成与性能指标	3
0.3.1 数字微波通信系统的组成	3
0.3.2 数字微波通信系统的性能指标	4
小结	5
习题	5
第 1 章 数字基带传输	6
1.1 数字基带信号的码型	6
1.1.1 二元码	7
1.1.2 三元码	8
1.1.3 多元码	11
1.2 基带信号的波形形成	12
1.2.1 形成网络的一般形式	12
1.2.2 理想低通传输函数	14
1.2.3 余弦滚降传输函数	14
1.3 最佳基带系统的误码性能	15
1.3.1 误码性能	16
1.3.2 基带传输的频谱利用率	19
1.4 时分复用(TDM)	19
小结	21
习题	22
第 2 章 数字微波调制与解调技术	23
2.1 二进制幅度键控(2ASK)	23
2.2 二进制相位键控(2PSK)	25
2.2.1 二进制绝对相位键控	25
2.2.2 二进制差分相位键控	27
2.3 多相相位键控(MPSK)	29
2.3.1 多相相位键控信号的正交展开	29
2.3.2 相位逻辑与差分编码	31
2.3.3 差分编码	33
2.3.4 四相绝对相位键控(4PSK)的调制	36
2.3.5 四相绝对调相信号的解调	40
2.3.6 四相相对相位键控的调制和解调(4DPSK)	42

2.3.7 八相相对相位键控的调制和解调(8DPSK)	44
2.4 多进制正交幅度调制(MQAM)	46
2.4.1 16QAM 的正交调制法	47
2.4.2 已调信号的相位	48
小结	48
习题	49
第3章 微波传播	50
3.1 电波在自由空间的传播	50
3.1.1 无线电波频段的划分与传播方式	50
3.1.2 无线电波的基本性质	51
3.1.3 自由空间的传播损耗	52
3.1.4 自由空间传播条件下收信电平的计算	53
3.2 微波传播的描述方法	54
3.2.1 惠更斯-菲涅耳原理	54
3.2.2 电波传播的菲涅耳区	55
3.2.3 菲涅耳区半径和菲涅耳带面积	58
3.3 地形对电波传播的影响	59
3.3.1 在平滑地面上的传播	59
3.3.2 电波在球形地面上的传播	61
3.3.3 电波在复杂地面的传播	63
3.4 大气对微波传播的影响	64
3.4.1 大气对微波的吸收	64
3.4.2 雨雾引起的衰减	65
3.4.3 大气使电波发生折射	66
3.4.4 影响传播余隙的因素	69
3.5 大气与地面效应造成的衰落特性	71
3.5.1 衰落的基本概念和特性	71
3.5.2 平衰落及其瑞利分布统计特性	72
3.5.3 频率选择性衰落	74
3.6 抗衰落技术	78
3.6.1 抗衰落技术概述	78
3.6.2 空间分集	80
3.6.3 几种常用的空间分集接收方式	82
3.6.4 频率分集	84
3.6.5 自适应均衡技术	86
3.6.6 智能天线(Smart antenna)	88
小结	90
习题	90
第4章 微波 SDH 传输技术	92
4.1 SDH 技术概述	92

4.1.1	SDH 产生的技术背景	92
4.1.2	SDH 基本概念和特点	93
4.2	SDH 的速度等级与帧结构	95
4.2.1	同步数字系列的速率	96
4.2.2	帧结构	96
4.2.3	段开销	97
4.2.4	管理单元指针(AU PTR)区域	100
4.2.5	通道开销	100
4.3	SDH 的复用原理	101
4.3.1	SDH 的复用结构	102
4.3.2	复用单元	102
4.3.3	常用 PDH 群路信号到 STM-1 的复用方法	104
4.4	SDH 传输网的分层	107
4.4.1	SDH 传输系统的组成	107
4.4.2	传输网分层模型	108
4.5	SDH 对形成新一代数字微波传输方式的影响	109
	小结	110
	习题	110
	第 5 章 数字微波通信的传输设备	111
5.1	数字微波通信发信设备的组成与性能指标	111
5.1.1	发信设备	111
5.1.2	发信设备的主要性能指标	112
5.1.3	微波振荡源	114
5.1.4	微波功率变频技术——上变频器	115
5.1.5	微波晶体管线性功率放大器	115
5.2	数字微波收信设备的组成及性能指标	117
5.2.1	收信设备	117
5.2.2	收信设备主要性能指标	117
5.2.3	微波晶体管低噪声放大器	118
5.2.4	微波收信混频电路	119
5.3	微波通信对天线设备的要求	122
5.3.1	微波通信天线及馈线系统形式	122
5.3.2	微波天线的技术要求	123
5.3.3	微波通信天线	126
5.4	收发公用器	128
5.5	微波收发信机电平图	129
5.6	微波通信系统的噪声	129
5.6.1	噪声及其计算	130
5.6.2	干扰噪声	135
5.7	公务和监控系统	136

5.7.1	公务传输通道的主要作用	136
5.7.2	公务传输方式	136
5.7.3	监控系统	137
5.8	备份与无损切换	140
5.8.1	备份工作方式	140
5.8.2	切换逻辑	141
5.8.3	无损切换	142
	小结	144
	习题	146
第6章	数字微波中继系统的总体设计考虑	148
6.1	假设参考通道与传输质量标准	148
6.1.1	数字微波信道假设参考通道	148
6.1.2	数字微波通信的线路传输质量指标	150
6.2	射频波道的频率配置	152
6.2.1	波道	152
6.2.2	收发波道的频率配置方式	152
6.2.3	波道间隔、相邻收发间隔、边沿保护间隔	153
6.2.4	射频波道的频率再用	153
6.2.5	6 GHz 干线传输的射频波道配置	154
6.3	系统性能的估算与指标分配	155
6.3.1	传输质量标准及在每跳上的分配	156
6.3.2	门限接收电平	156
6.3.3	系统增益	157
6.3.4	传输损耗和电平余量	157
6.3.5	高误码率指标验算	157
6.3.6	恶化储备量的分配	158
6.3.7	干扰储备量的分配	158
6.3.8	可用性指标验算	159
6.4	路径效应和大气效应的估计与控制	159
6.4.1	路径的几何表述	160
6.4.2	余隙标准与天线高度	163
6.4.3	大气效应的估计和控制	168
6.5	路由工程设计举例	169
6.5.1	路由设计概述	169
6.5.2	天线高度的选取	171
	小结	176
	习题	176
第7章	数字微波中继系统的整机性能测试	178
7.1	微波收发信机性能测试	178
7.1.1	发信机性能测试	178

7.1.2 收信机性能测试	180
7.2 误码性能测试	183
7.2.1 码组发生器	184
7.2.2 误码仪	184
7.2.3 室内误码测试	187
7.2.4 现场误码测试	188
7.3 时钟抖动性能测试	189
7.3.1 时钟抖动测试原理	189
7.3.2 输出端最大剩余抖动的测试	193
7.3.3 输入端抖动容限的测试	193
7.4 抗频率选择性衰落性能的测试	194
7.4.1 多径衰落模拟器	194
7.4.2 实验室模拟测量	195
7.5 其他性能测试	197
7.5.1 基带数字接口测试	197
7.5.2 勤务信道测试	197
7.5.3 切换性能测试	197
7.5.4 电源测试	198
小结	198
习题	199
参考文献	201

第0章 数字微波通信概述

微波通信是一种先进的通信方式,它利用微波来携带信息,通过电波空间同时传送若干相互无关的信息,并且还能进行再生中继。它具有传输容量大、长途传输质量稳定、投资少、建设周期短和维护方便等特点,得到了广泛的应用。而建立在微波通信和数字通信基础上的数字微波通信,同时具有数字通信和微波通信的优点,更是受到各国的普遍重视。因此数字微波中继通信、光纤通信和卫星通信一起被称为现代通信传输的三大主要手段。

0.1 数字微波通信发展概况

1931年出现了最初的调幅微波通信设备,它的工作频率为1.667 GHz。在第二次世界大战后,由于雷达的发展,使微波技术和微波中继通信得到迅速的发展。从1947至1951年,相继完成了4 GHz 480路电话和一个电视波道的多路微波中继通信系统。1951年“TDZ”设备开始使用,它的工作波长均为7.5 cm,具有6个宽频带双向波道,每个高频波道可通一路电视节目或600路电话的调频多路微波通信系统。之后发展为每个波道可通1200路电话,共有10个双向波道的“TD—3”系统。1960年出现了具有8个波道,每个波道容量为2200路电话或一个彩色电视节目再加几百路电话的6 GHz宽频带系统。20世纪70年代,调频微波通信已把每个波道的电话容量扩大到2700路。随着通信领域各种通信方式的出现和数据交换对通信的要求,微波通信技术得到了迅速发展。自1965年来,各国相继投入了对2、4、6、8、11、15、20 GHz及毫米波段的数字微波通信系统的研究,其调制方式相继出现2PSK、4PSK、8PSK(移相键控),以及16QAM、64QAM(正交调幅)等新型的调制和解调方式,其传输速率可达几百Mb/s。

我国的数字微波通信研究始于20世纪60年代。在20世纪60年代至70年代初为起步阶段,研制出了小、中容量数字微波通信系统,并很快投入了应用,调制方式以四相相移键控(QPSK)为主,并有少量设备使用了八相相移键控(8PSK)调制。20世纪80年代,我国数字微波通信的单波道传输速率上升到140 Mb/s,调制方式一般采用正交幅度调制16QAM,同时自适应均衡、中频合成和空间分集接收等高新技术开始出现。20世纪80年代后期至今,随着同步数字序列(SDH)在传输系统中的推广应用,数字微波通信进入了重要的发展时期。目前,单波道传输速率可达300 Mb/s以上,为了进一步提高数字微波系统的频谱利用率,同波道交叉极化传输、多重空间分集接收和无损伤切换等技术得到了使用。这些新技术的使用将进一步推动数字微波中继通信系统的发展。

0.2 数字微波通信的主要特点

根据所传输基带信号的不同,微波通信又分为两种制式。用于传输频分多路—调频(FDM—FM)基带信号的系统叫做模拟微波通信系统;用于传输数字基带信号的系统叫做数字微波通信系统。后者又进一步分为PDH微波和SDH微波通信两种体制。SDH微波通信

系统是今后微波通信系统发展的主方向。

不管是模拟微波通信还是数字微波通信,其微波通信最基本的特点可以概括为6个字:“微波、多路、接力”。

“微波”是指射频为微波频率,特点是微波工作频段宽,波段频率为300 MHz~300 GHz,波长为1 m~1 mm,它包括了分米波、厘米波和毫米波3个频段。这个频段宽度几乎是长波、中波、短波及特高频等各个频段总和的1000倍,所以它可容纳较其他频段多得多的话路,而且不致互相干扰。

由于微波频率高,波长短,微波通信一般使用面式天线。当面式天线的口面积给定后,增益与波长的平方成反比,故微波通信很容易制成高增益天线。当波长比周围物体的尺寸小得多时,电磁波近似于光波特性和特性,可以利用微波天线把电磁波聚集成很窄的波束,得到方向性很强的天线。例如,直径3 m的抛物面天线,当工作波长为 $\lambda = 7.5$ cm,天线效率 $\eta = 0.6$ 时,其天线增益可达40 dB,相当于无方向性天线的发射功率提高了10000倍。

此外,在微波频段,天电干扰和工业干扰及太阳黑子的变化基本上不起作用,而这些干扰对短波通信的影响却十分严重,所以微波通信的可靠性和稳定性可以做得很高。

“多路”是指微波通信的通信容量大,即微波通信设备的通频带可以做得很宽。例如对4 GHz的设备而言,其通频带按1%计算,可达40 MHz,其所提供的带宽正符合ISDN所要求的宽带传输链路的要求(见参考文献7)。

“接力”是目前广泛使用于视距微波的通信方式。由于地球是圆的,加之地面上的地貌(如山川)所限,使得地球上两点(两个微波站)间不被阻挡的距离有限。为了可靠通信,一条长的微波通信线路就要在线路中间设若干个中继站,采用接力的方式传输发送端的信息。

近些年来,由于通信技术的发展及通信设备的数字化,数字微波设备与模拟微波设备相比,在微波设备中占有绝对大的比重。而数字微波除了具有上面所说的微波通信的普遍特点外,还具有数字通信的特点:

① 抗干扰性强,整个线路噪声不累积。经数字微波信道传输的数字信号,要经过微波中继站的多次转发,站上有对数字信号进行处理的再生中继器。而再生中继器是采用抽样判决的办法来接收每一个码元。经过一个中继段传输后,只要干扰噪声还没大到影响对信码错判的程度,经过判决识别后,就可以把干扰噪声清除掉,再生出与发送端一样的“干净”波形,从而继续传输。这种再生作用使数字微波通信的线路噪声不逐站累积,提高了抗干扰性。而模拟微波通信的线路噪声是随线路长度增加而增加,并且逐站累积的。

必须说明的是,一旦噪声干扰对数字信号造成了误码,在继续传输过程中被纠正过来的可能性是很小的,所以误码被认为是逐站累积的。

② 保密性强,便于加密。数字信号本身就具有一定的保密性,又因为各种信号数字化后形成的信码,可采用不同的规律或方式,方便灵活地加进密码,在线路中传输,接收端再按相同的规律解除密码,所以说这种通信方式的保密性强。

③ 器件便于固态化和集成化,设备体积小、耗电少。

④ 便于组成综合业务数字网(ISDN)。

数字微波的主要缺点是要求传输信道带宽较宽,因而产生了频率选择性衰落,其抗衰落技术比模拟微波中相应的技术要复杂。

0.3 数字微波通信系统的组成与性能指标

0.3.1 数字微波通信系统的组成

数字微波传输线路的组成形式可以是一条主干线,中间有若干分支,也可以是一个枢纽站向若干方向分支。但不论哪种形式,主要是由微波终端站、中继站和分路站等组成的,如图0-1所示。但要构成一个完整的数字微波通信系统,还应包括其他部分,如图0-2所示,数字微波通信系统总是由图0-2中给出的几部分组成的。

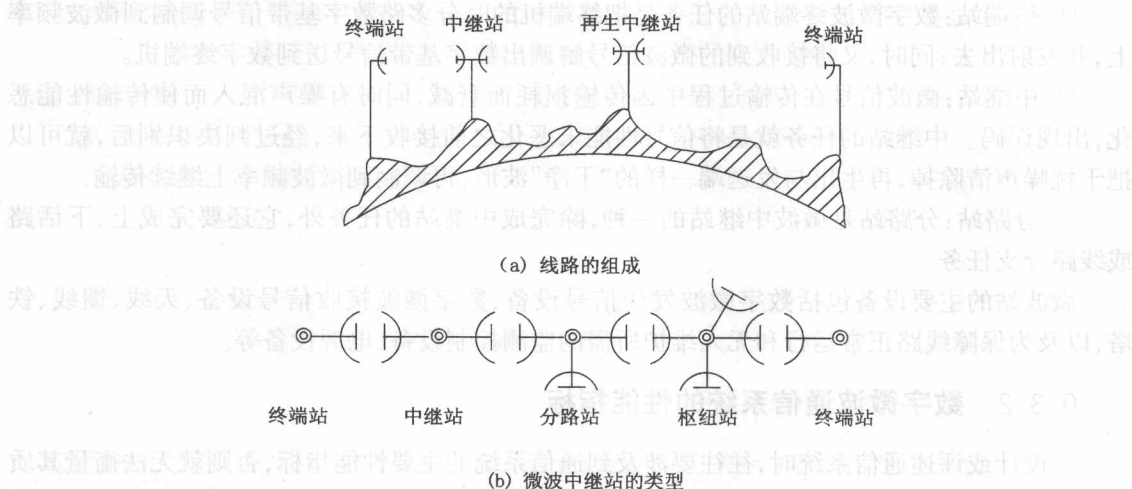


图 0-1 微波通信的信道构成

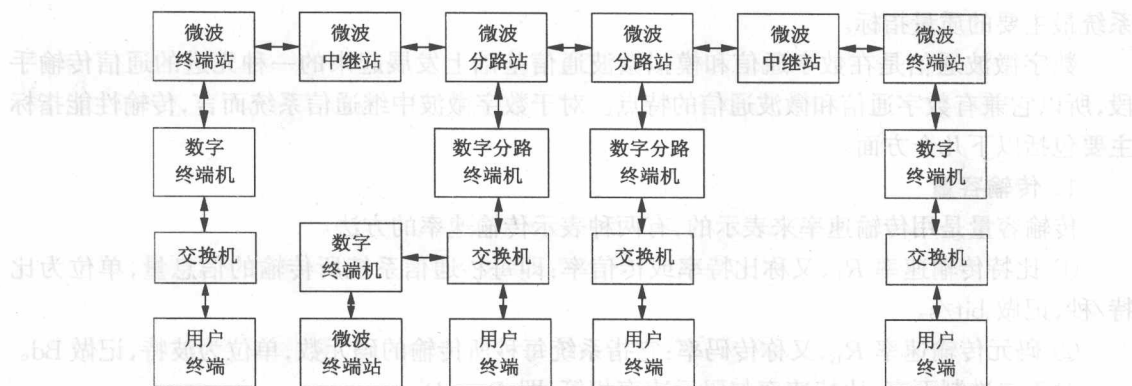


图 0-2 数字微波通信系统方框图

1. 用户终端

用户终端指直接为用户所使用的终端设备,如自动电话机、电传机、计算机和调度电话机等。

2. 交换机

交换机是用于功能单元、信道或电路的暂时组合以保证按要求进行通信操作的设备。用

户可通过交换机进行呼叫连接,建立暂时的通信信道或电路。这种交换可以是模拟交换,也可以是数字交换。

3. 数字终端机

数字终端机的基本功能是把来自交换机的多路音频模拟信号变换成时分多路数字信号,送往数字微波传输信道,以及把数字微波传输信道收到的时分多路数字信号反变换成多路模拟信号,送到交换机。

4. 微波站

微波站的基本功能是传输数字信息。按工作性质不同,可分为数字微波终端站、数字微波中继站和数字微波分路站三类。

① 终端站:数字微波终端站的任务是把终端机的时分多路数字基带信号调制到微波频率上,并发射出去;同时,又将接收到的微波信号解调出数字基带信号送到数字终端机。

② 中继站:微波信号在传输过程中因传输损耗而衰减,同时有噪声混入而使传输性能恶化,出现误码。中继站的任务就是将信号性能未恶化之前接收下来,经过判决识别后,就可以把干扰噪声清除掉,再生出与发送端一样的“干净”波形,再调制到微波频率上继续传输。

③ 分路站:分路站是微波中继站的一种,除完成中继站的任务外,它还要完成上、下话路或线路分支任务。

微波站的主要设备包括数字微波发送信号设备、数字微波接收信号设备、天线、馈线、铁塔,以及为保障线路正常运行和无人维护所需的监测控制设备、电源设备等。

0.3.2 数字微波通信系统的性能指标

在设计或评述通信系统时,往往要涉及到通信系统的主要性能指标,否则就无法衡量其质量的优劣。性能指标也称质量指标,它是对整个系统综合提出或规定的。通信系统的性能指标涉及其有效性、可靠性、适应性、标准性和经济性等,其中传输信息的有效性和可靠性是通信系统最主要的质量指标。

数字微波通信是在数字通信和模拟微波通信基础上发展起来的一种先进的通信传输手段,所以它兼有数字通信和微波通信的特点。对于数字微波中继通信系统而言,传输性能指标主要包括以下几个方面。

1. 传输容量

传输容量是用传输速率来表示的,有两种表示传输速率的方法。

① 比特传输速率 R_b , 又称比特率或传信率:即每秒通信系统所传输的信息量,单位为比特/秒,记做 bit/s。

② 码元传输速率 R_B , 又称传码率:它指系统每秒所传输的码元数,单位为波特,记做 Bd。

对于二进制而言,比特速率与码元速率相等,即 $R_b = R_B$;

对于 M 进制, $R_b = R_B \log_2 M$ 。

2. 频带利用率

数字通信在信号传输时,传输速率越高,所占用的信道频带也越宽。为了能体现出信息的传输效率,说明传输数字信号时频带的利用情况,使用了频带利用率 η 这一指标,它表示单位频带的信息传输速率,即

$$\eta = \frac{\text{信息传输率}}{\text{频带宽度}} \text{ b/(s} \cdot \text{Hz)}$$

3. 传输质量

传输数字信号时,由于噪声和其他原因,对方会判断错误,传输的差错率代表了传输的质量。差错率有两种表示方法。

① 比特误码率。比特误码率又称误比特率,用符号 P_b 表示,其定义式为

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{信道传输的总比特数}}$$

② 码元误码率。码元误码率简称误码率,用符号 P_B 表示,其定义式为

$$P_B = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{信道传输的总码元数}}$$

显然,对于二进制系统, $P_b = P_B$ 。由于一般通信系统都是二进制的,所以本书中没严加区别。

小 结

1. 数字微波通信发展概况。

2. 数字微波通信不仅具有微波通信的“微波、多路、接力”的特点,而且还具有数字通信的特点:抗干扰性强、整个线路噪声不累积;保密性强,便于加密;器件便于固态化和集成化,设备体积小、耗电少;便于组成综合业务数字网(ISDN)。

数字微波的主要缺点是要求传输信道带宽较宽,因而产生了频率选择性衰落,其抗衰落技术比模拟微波中相应的技术复杂。

3. 数字微波通信系统由微波终端站、中继站和分路站及空间传输线路等组成。

4. 评价数字通信系统优劣的主要性能指标是:传输容量、频带利用率和比特误码率等。

习 题

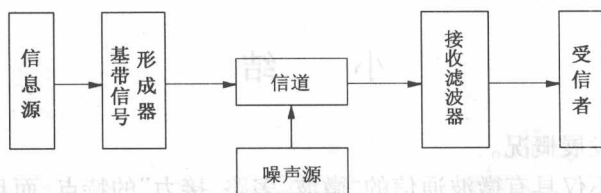
0-1 数字微波通信的主要优缺点是什么?

0-2 微波通信信道主要由哪些部分构成?

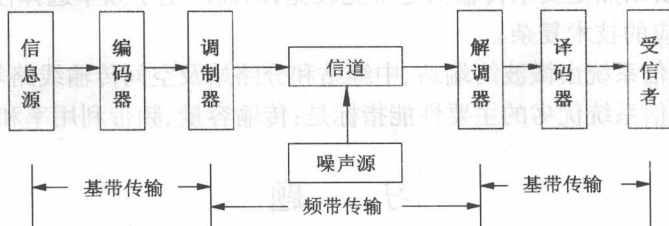
0-3 衡量数字微波通信系统的主要性能指标有哪些?怎样定义的?

第 1 章 数字基带传输

数字信号传输方式一般分为基带传输和频带传输两大类,如图 1-1 所示,图 1-1(a)为基带传输,基带传输是把数字基带信号不经调制直接送往信道进行传输的方式;图 1-1(b)为频带传输系统,频带传输就是用调制方法,将基带信号的频谱搬移到某一个高频的载波频段内进行传输。学习数字微波通信的主要内容是调制和解调技术、同步信号提取、微波传播和微波中继系统的总体设计等。具体的电路、各种微波电路和天线等知识,仅做非常简单介绍。



(a) 基带传输系统



(b) 频带传输系统

图 1-1 数字通信系统模型

为了使同学们对数字微波通信系统有一个全面的了解,本章对基带传输做简单介绍,学习过通信原理的同学可跳过此章。

1.1 数字基带信号的码型

数字通信中,用代码来表示要传送的信息。一般情况下,要传送的信息可以用下列形式来代表: $\cdots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, \cdots, a_{k-1}, a_k, \cdots$, 简记为 $\{a_k\}$ 。其中代码 a_k 是消息的一个基本单元,称为码元或符号。在二进制中, a_k 可取 0 或 1; 在多元码中, a_k 可取 0、1、2、 $\cdots$ 、 $(M-1)$ 个电平值。二进制的传输速率用比特/秒(b/s)来表示,此速率称为比特速率。多元码的传输速率用每秒传输的符号个数来表示,单位为波特(Bd),称为符号或码元速率。比特为信息量的基本单位。每个波特所含的信息量为 $\log_2 M(\text{bit})$ 。

实际传输时,用电脉冲来表示代码,将电脉冲的形状称为数字信号波形,而把电脉冲序列的结构形式称为数字信号的码型。数字信号的码型和波形共同决定着它的频谱结构。合理地

设计数字信号的码型和波形,使之适应信道的要求,这是传输系统中两个十分重要的问题。

1.1.1 二进制

二进制的矩形脉冲幅度取值只有两种不同电平。图 1-2 给出几种二进制的码型图案。

1. 单极性不归零码(NRZ)

用高电平表示二进制的“1”,用低电平(一般为 0 电平)表示二进制的“0”,在整个码元周期 T_b 内电平保持不变,如图 1-2(a)所示。

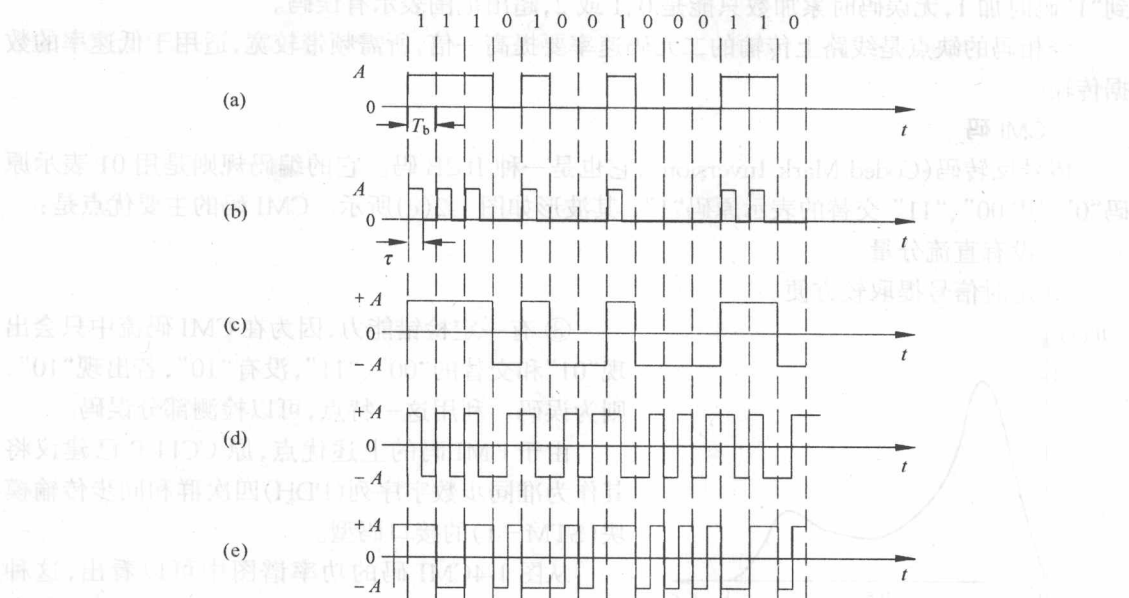


图 1-2 几种二进制的码型

2. 单极性归零码(RZ)

它与单极性不归零码不同的是在一个码元周期内,高电平的持续时间为 τ ($\tau < T_b$),其余时间返回低电平。若 $\tau/T_b = 50\%$,则称其为 50% 归零码或半占空码。如图 1-2(b)所示。

3. 双极性不归零码(BPNRZ)

用正电平表示“1”,用负电平表示“0”,正负电平绝对值相等,在整个码元周期 T_b 内保持不变,如图 1-2(c)所示。在信码“0”、“1”等概时,这种二进制码不包含直流分量。

上述前两种最简单的二进制码其功率谱中有丰富的低频分量和直流分量,如图 1-3 所示。这对于大多数采用交流耦合的有线信道和放大器来说是很不方便的。NRZ 码

主要用于数字逻辑电路;BPNRZ 码不含直流分量,占用带宽较窄,常用于载波调制,可抑制载波分量。RZ 码含有比特速率的离散频率分量,常用于比特时钟的提取。

图 1-3 中未标出离散谱分量,在给出功率谱图时,还应假定比特序列为伪随机序列。

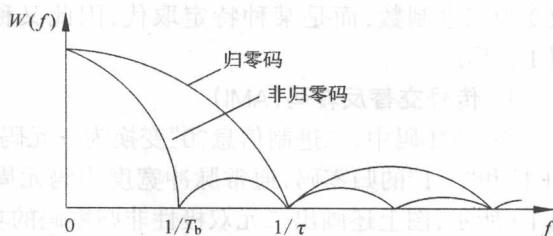


图 1-3 常用二进制的功率谱图

4. 分相码

分相码又称为数字双相码(Manchester 码)。它的编码规则是用 10 表示原码“1”,用 01 表示原码“0”,这种编码实际上是将一位原始码用两位二进制码表示,所以称为 1B2B 码。其波形如图 1-2(d)所示。分相码的优点是:

- ① “0”、“1”成对出现,没有直流分量。
- ② “0”、“1”变化出现在每一原始码元中,有利于位定时的恢复。
- ③ 接收端易实现误码监测。方法之一是用一个初始值“1”的累加器,收到“0”码时减 1,收到“1”码时加 1,无误码时累加数只能是 0、1 或 2,超出范围表示有误码。

分相码的缺点是线路上传输的二元码速率要提高一倍,所需频带较宽,适用于低速率的数据传输。

5. CMI 码

传号反转码(Coded Mark Inversion),它也是一种 1B2B 码。它的编码规则是用 01 表示原码“0”,用“00”、“11”交替的表示原码“1”,其波形如图 1-2(e)所示。CMI 码的主要优点是:

- ① 没有直流分量。
- ② 定时信号提取较方便。

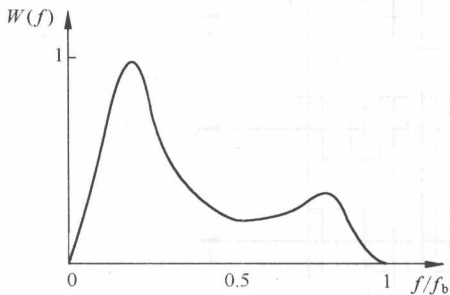


图 1-4 CMI 码的功率谱图

- ③ 有一定检错能力,因为在 CMI 码流中只会出现“01”和交替的“00”、“11”,没有“10”,若出现“10”,则为误码。利用这一特点,可以检测部分误码。

由于 CMI 码的上述优点,原 CCITT 已建议将其作为准同步数字序列(PDH)四次群和同步传输模块(STM-1)的接口码型。

从图 1-4 CMI 码的功率谱图中可以看出,这种码型的大部分能量都集中在低频处,主要能量集中在 $f_b/4$ 附近,对信道带宽的要求较低,而且具有频率的离散谱分量(未标出),并且可用于时钟提取。

1.1.2 三元码

在三元码数字基带信号中,信号幅度取值有三个: +1、0、-1。由于实现时并不将二进制数变为三进制数,而是某种特定取代,因此又称为准三元码或伪三元码。它们的波形图如图 1-5 所示。

1. 传号交替反转码(AMI)

在 AMI 码中,二进制信息“0”变换为三元码序列中的“0”,二进制信息“1”则交替地变换为“+1”和“-1”的归零码,通常脉冲宽度为码元周期之半。理论分析表明,AMI 码的功率谱如图 1-6 所示,图上还画出二元双极性非归零码的功率谱,以便相互比较。AMI 码的功率谱中无直流分量,低频分量较小,能量集中在频率为 1/2 码速之处。具有这种频谱形状的信号适宜于用交流放大器处理。位定时频率(即码元速率)分量虽然为 0,但只要将基带信号经全波整流变为二元归零码,即可得到位定时信号。AMI 码具有检错能力,如在传输过程中因传号极性交替规律受到破坏而出现误码,则在接收端很容易发现这种错误。

要注意的是,当信息中出现长连“0”码时,由于 AMI 码中长时间不出现电平跳变,因而定时提取遇到困难。通常数字信号传输线路中不允许连“0”码超过 15 个,否则位定时就要遭到